

## 繊維質物質を用いた高含水比泥土の新しい再資源化工法に関する研究

著者	森 雅人
号	4
学位授与番号	18
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/37948">http://hdl.handle.net/10097/37948</a>

氏 名	もり まさと 森 雅 人
授 与 学 位	博士 (環境科学)
学 位 記 番 号	環博第18号
学 位 授 与 年 月 日	平成19年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院環境科学研究科 (博士課程) 環境科学専攻
学 位 論 文 題 目	繊維質物質を用いた高含水比泥土の新しい再資源化工法に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 高橋 弘
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 高橋 弘    東北大学教授 松木 浩二 東北大学教授 境田 清隆    東北大学教授 岸野 佑次 (工学研究科)

## 論文内容要旨

建設工事から発生する建設汚泥や浄水場の浄水発生土などは含水比が高く、直接の再利用が困難であることから、再資源化率が極めて低く、そのほとんどが最終処分場で処理されている。そのため、近年では最終処分場への負荷軽減や国策でもある循環型社会の構築へ寄与するためにも、高含水比泥土の有用な再資源化が強く望まれてきている。本論文は、高含水比泥土に対する従来の再資源化工法とは全く異なる新しい再資源化工法を提案し、生成される土砂の有効利用について具体的に論じたもので、全6章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、古紙破砕物と高分子系改良剤を用いた高含水比泥土の新しい再資源化工法を提案するとともに、処理土の強度特性・変形特性について実験的に検討した。本章で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 建設現場から排出された建設汚泥および2種類の浚渫土砂を試料として、古紙破砕物・高分子系改良剤および助剤の添加量を種々に変化させて処理土を作成し、目視により団粒化の可否を評価した。その結果、高含水比泥土の含水比毎の古紙および薬剤の最適添加量を決定した。
- 2) 模擬泥水を用いて繊維質固化処理土と固化処理土の一軸圧縮試験を実施した。その結果、繊維質固化処理土は固化処理土に比べて同量のセメント添加量で2～3倍の一軸圧縮強さを持つことが確認された。また、固化処理土の破壊ひずみが2%以下であるのに対し、繊維質固化処理土は8%程度と非常に大きいことが確認された。さらに、固化処理土の変形係数は硬く脆い材質であることを示しているのに対し、繊維質固化処理土は通常土と同程度となることが確認された。
- 3) 模擬泥水を用いて繊維質固化処理土の三軸圧縮(CD)試験を実施した。その結果、繊維質固化

処理土は粘着力  $C_d=90[\text{kN/m}^2]$  程度の強度を持ち、かつ内部摩擦角  $\phi_d=30^\circ$  以上を確保できることを確認した。換言すれば、繊維質固化処理土は高い粘着力と内部摩擦力の両方を有する良質な構造資材であることを確認した。

- 4) 模擬泥水を用いて繊維質固化処理土と固化処理土の圧裂引張り試験を実施した。その結果、繊維質固化処理土は固化処理土と比べて大きな引張り残留強度があり、引張りに対しても大きな変形に耐えて粘り強い性質を持つことが確認された。従って、地震時のように大きな動的荷重がかかっても地盤全体に応力が分散され、高い破壊ひずみを生み出すと考えられる。つまり、繊維質固化処理土は周辺地盤や改良盛土との間に剛性の相違が無い場合、互いのなじみがよく、盛土材として優れていると考えられる。
- 5) 実際の建設汚泥を用いて繊維質固化処理土と固化処理土の強度特性についてさらに詳細に検討するため、三軸圧縮 (UU) 試験を実施した。その結果、固化処理土の応力-ひずみ曲線は明瞭なピーク応力が破壊ひずみとして表れており、破壊形状が明瞭なせん断面が現れて局所的な変形集中を示した。一方、繊維質固化処理土の応力-ひずみ曲線は前述の三軸圧縮 (CD) 試験と同様に明瞭なピーク応力が現れず、破壊形状が樽型変形を起こし、局所的な変形集中を生じなかった。すなわち、繊維質固化処理土の強度は、セメント系固化材による強度が繊維質を挟んだ形での強度であり、応力の集中が繊維を通して分散されていると推察される。

第3章では、繊維質固化処理土および固化処理土を用いて乾湿繰り返し試験を行った。その結果、固化処理土はサイクルの進展に伴い、乾燥収縮により亀裂が発生して劣化するが、繊維質固化処理土は乾湿繰り返しを受けてもほとんど劣化せず、極めて高い耐久性を示すことが確認された。従って、繊維質固化処理土は地下水位の変動・気象条件による乾湿繰り返しを受ける場所においても使用可能であることが確かめられた。また、繊維質固化処理土が乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示す原因として、土砂内部に存在する繊維質物質が土砂と絡み合っ て土粒子間結合力を高め、乾燥収縮によるき裂の発生を抑制しているためであることが顕微鏡観察および破壊ひずみの観点から確認された。

さらに、繊維質固化処理土および固化処理土を用いて凍結融解試験を行った結果、固化処理土はサイクル数の進展に伴い、一軸圧縮強さおよび破壊ひずみは低下する傾向にあるが、繊維質固化処理土はほとんど低下せず、極めて高い耐久性を示すことが確認された。繊維質固化処理土が凍結融解に対して高い凍上耐久性を示す理由としては、上述の通り、内部で繊維質物質と土粒子が絡み合っ て土粒子間結合力を高め、凍結によって間隙水の体積が増大しても土粒子間結合力が失われなかったためと考えられる。

ところで、今回は実際の泥水に含まれる有機物によるバラツキを抑えるため模擬泥水を用いたが、上述したように繊維質固化処理土の乾湿繰り返しに対する高い耐久性は、土砂内部に存在する繊維質物質と土粒子が絡み合っ て土粒子間の結合力を高めることが主な理由であり、固化の程度にはほとんど関係しないので、実際の泥水から生成される繊維質固化処理土も本実験結果と同様に乾湿繰り返しおよび凍結融解に対して高い耐久性を示すと考えられる。ただし、これについては今後、実験的に検討したいと考えている。

第4章では、再生紙工場から発生する廃棄物であるペーパースラッジ(PS)のリサイクル率の向上および本研究で開発した繊維質固化処理土工法の施工コストの安定化およびコスト削減を目指して、繊維質固化処理土工法に PS を用いる可能性について実験的に検討した。本章で得られた成果をまとめると以下のようになる。

- 1) 古紙破砕物の代わりに PS を高含水比泥土に混合して処理土を作成し、乾湿繰り返し実験を行った結果、処理土は乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示した。つまり、乾湿繰り返しに対する耐久性という観点からは、PS は古紙破砕物の代用品になり得ることが確かめられた。
- 2) 薬剤を添加した処理土と薬剤を添加しない処理土の2種類を作成し、乾湿繰り返し実験を行った結果、薬剤を添加しない処理土の方が高い強度を示した。また乾湿繰り返しに対する耐久性は両者ともに高く、薬剤は耐久性に関与しないのみならず、セメントの水和反応を妨げることから、処理土の強度を低下させる要因になっていることが分かった。従って、仮置き場・養生期間が十分にあるような現場では、薬剤を添加せず、PS あるいは古紙破砕物等の繊維質物質のみで泥土を処理した方が強度的およびコスト的に優れていることが確認された。
- 3) しかしながら、PS のみにより再生処理された土砂、すなわち PS 固化処理土は、変形特性の点からは十分な改質が行われているとは言えないことが分かった。そこで、高含水比泥土に PS と古紙破砕物を添加して PS 繊維質固化処理土を作成し、一軸圧縮試験を実施して処理土の強度特性を調べた結果、従来の古紙添加量の約半分の  $30\text{kg/m}^3$  程度の古紙破砕物を混合すると、乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示し、かつ強度特性にも優れた土砂を生成できることが確かめられた。またその結果、約 75% の施工コスト削減の可能性を示し得た。

第5章では、既に開発した繊維質固化処理土工法の応用として繊維質処理土を製造し、のり面等道路緑化基盤材および屋上緑化基盤材への適用性について実験的に検討した。本章で得られた成果をまとめると以下のようになる。

- 1) 実際の建設現場から排出された建設汚泥を原料とした繊維質処理土をのり面等道路緑化基盤材として屋外フィールドで試験施工した結果、一般緑化土と比較して植被率・生育本数・草丈すべての調査項目において満足する結果を得た。このことにより、本研究で生成した繊維質処理土が緑化基盤材として有用であることを確認した。
- 2) 市販の屋上緑化人工軽量土壌の有効水分保持量と模擬泥水および浄水発生土を原料とした繊維質処理土の有効水分保持量を比較した結果、繊維質処理土の有効水分保持量は  $300[\text{l/m}^3]$  を超えており、市販の屋上緑化基盤材の有効水分保持量のおよそ 3 倍の値を確認した。これは古紙破砕物を添加することにより、 $pF1.5 \sim 3.8$  の毛管孔隙の量が増加するためであると考えられる。
- 3) 試料の乾燥によって土粒子の団粒が凝集し、粗粒化することによって  $pF1.5$  以下の粗孔隙の量が多くなり透水係数が大きくなることが分かった。透水係数と気相率は相関関係を示し、固相率が同程度であれば湿潤時比重も連動することが確かめられた。
- 4) 模擬泥水および浄水発生土を原料とした繊維質緑化土の陽イオン交換容量はすべての試料において目標値を満足した。
- 5) 模擬泥水を原料とした試料の最適添加量は、DRY 状態では、土粒子量/古紙破砕物量比が  $5.0[-]$  の配合であることが分かった。WET 状態では湿潤時比重  $1.0[-]$  以下・気相率 25% 以上の目標値

をクリアできなかったが、現状では同比 6.0[-]の配合が最適となる。

- 6) 浄水発生土を原料とした試料の最適添加量は、活性炭入りでは土粒子量/古紙破碎物量比が 6.0[-]であることが分かった。活性炭無しでは湿潤時比重 1.0[-]以下の目標値を設定しなければ、同比 6.0[-]の配合が最適となる。

本章では、繊維質処理土に添加する諸材料の最適添加量や性能目標値の検討を行った。また、建設汚泥や浄水発生土を原料として DRY 方式により製造した繊維質処理土を利用して、のり面等道路緑化植生試験・屋上緑化実地試験等を実施し、実用性を確認した。

ところで、ダムの浚渫工事から排出されるヘドロや碎石場の製造工程から排出されるヘドロは発生量が大量であり、再利用の技術開発はほとんど進んでいない。この問題を解決するため、ヘドロ・泥土を現位置で加工し、緑化基盤材へ再利用する試みが行われている。しかし、一般に緑化基盤材の製造方法は工場生産方式（DRY 方式）を採用しているが、ダム工事・碎石場では、乾燥・解砕作業は経済性・気象条件等の問題から、DRY 方式での緑化土の製造は難しいと思われる。そのため本章では、性能試験の前提条件として WET 式と DRY 式を提案した。

WET 方式で生成された土壌は、透水係数を  $10^{-3}$  [cm/s]以上に改善できれば連動して液相が減少し気相が増加することになる。それゆえ、例えば現場で発生する廃木材を利用した粗チップ等を混合すれば強制的に間隙を作り、通気させることが可能となり WET 方式による緑化基盤材の性能を向上させることが可能と考えられる。

また、砂丘地では、降雨・灌漑後の重力による水分移動が著しく保水性に乏しいため、作物栽培には頻繁な灌水が必要となる。このような砂丘地に WET 方式による緑化基盤材を混合することにより、砂丘地にとっては有効水分保持量を高める効果が発揮され、また一方で WET 方式による緑化基盤材としては透水係数が改善され、気相が増加することになる。WET 方式による性能向上についての定量評価については今後の課題である。

第 6 章は結論である。

# 論文審査結果の要旨

建設工事から発生する建設汚泥や浄水場の浄水発生土などは含水比が高く、直接の再利用が困難であることから、再資源化率が極めて低く、そのほとんどが最終処分場で処分されている。そのため、近年では最終処分場への負荷軽減および国策でもある循環型社会の構築へ寄与するため、高含水比泥土の有用な再資源化が強く望まれてきている。本論文は、高含水比泥土に対する従来の再資源化工法とは全く異なる新しい再資源化工法を提案し、生成される土砂の有効利用について具体的に論じたもので、全6章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、高含水比泥土に繊維質物質である古紙破砕物と高分子系改良剤を混合し、破壊強度および破壊ひずみの高い良質な土砂(繊維質固化処理土)を生成する新しい再資源化処理工法(繊維質固化処理土工法)を提案するとともに、繊維質固化処理土の強度特性・変形特性について詳細に検討している。高含水比泥土に古紙破砕物を混合して見掛けの含水比を低下させ、さらに高分子系改良剤を混合してハンドリング性を向上させる工法は本研究で初めて提案するものであり、これは高含水比泥土の再資源化率向上に寄与する有用な知見である。

第3章では、繊維質固化処理土の劣化耐久性について実験的に検討している。生成された繊維質固化処理土を盛土材・埋戻し材として再利用する場合、土砂は乾湿繰り返しの影響を受ける。また寒冷地で使用する場合、凍結融解の影響も受けることになる。本章では、従来工法で生成された固化処理土および本工法で生成された繊維質固化処理土を用いて乾湿繰り返し試験および凍結融解試験を行った結果、繊維質固化処理土は固化処理土に比べて極めて高い耐久性を有すること、およびこの高い耐久性は古紙の繊維質と土粒子が複雑に絡み合い、土粒子間結合力を高めているためであることを確認している。これらは循環型社会の構築に寄与する重要な知見である。

第4章では、再生紙工場から排出されるペーパースラッジ(PS)の有効利用について検討している。古紙は市場価格の変動を大きく受けるため、混合する古紙破砕物の量を削減することができれば、施工コストの安定化およびコスト縮減に繋がる。そこで本章ではPSに着目し、PSが古紙破砕物の代替品になり得るかどうかについて検討している。その結果、PSと少量の古紙破砕物を用いれば、盛土材として十分な性能を有する土砂が生成できることを確認し、最大で75%のコスト縮減が可能になることを示している。これは、高含水比泥土の再資源化率の向上のみならずPSの有効利用という点でも有用な知見である。

第5章では、固化材を用いずに泥土を処理し、生成される土砂を植生基盤材として再利用するための基礎実験の結果について述べている。本章では、軽量性、保水性、保肥性、三相分布、透水性などの点から植生基盤材の土壌物理特性について検討し、全てのパラメータの目標値を満足するための最適古紙添加率を求め、浄水発生土等の高含水比泥土から優れた植生基盤材を生成するための処理工法を提案している。これは、廃棄物を用いて緑化等の環境修復・環境保全が行えることを示したものであり、今後の緑化工事に対する極めて有益な知見を与えている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は、これまで処分に苦慮していた高含水比泥土の新しい再資源化工法を提案するとともに、生成される繊維質固化処理土が盛土材・埋戻し材として最適であること、さらには繊維質処理土は植生基盤材として極めて優れた性能を有していることを示し得たことは、高含水比泥土の再資源化率の向上に繋がるものであり、環境科学の発展に寄与するところが少なくない。よって本論文は博士(環境科学)の学位論文として合格と認める。